

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Návrh nové technologie obrábění součástí se žárovým  
nástríkem**

**Proposal of New Technology Machining of Parts  
with Thermal Coating**

Student:

Bc. Jiří Beran

Vedoucí diplomová práce:

Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Beran**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Specializace: 20 Strojírenská technologie

Téma: **Návrh nové technologie obrábění součástí se žárovým nástřikem**  
**Proposal of New Technology Machining of Parts with Thermal Coating**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky žárových nástřiků.
2. Popis stávající technologie obrábění.
3. Návrh nové technologie obrábění.
4. Technicko-ekonomické zhodnocení.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [3] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007, s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [4] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007, s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [5] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 15.5.2012 .....

..... Jiří Běla .....  


podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 15.5.2012 .....

..... Jiří Beran .....

podpis

Bc. Jiří Beran

Myslechovice 73, 783 21 Chudobín

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BERAN, J. *Návrh nové technologie obrábění tvarových ploch součástí s kovovým nástřikem: diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012, 59 s. Vedoucí práce : Petrů, J.

Diplomová práce se zabývá návrhem nové technologie obrábění součástí se žárovým nástřikem. Úvodní část obsahuje seznámení s problematikou žárových nástřiků se zaměřením na metodu plazmového nanášení. Dále jsou v práci uvedeny základní teoretické informace o třískovém obrábění žárových nástřiků, především o soustružení a broušení. V praktické části diplomové práce je popsána stávající a nově navržená technologie obrábění plazmového nástřiku. Bylo vypracováno technicko-ekonomické zhodnocení, ve kterém byly vypočítány úspory, které vzniknou při zavedení nové metody obrábění. V závěru je proveden rozbor celé inovace.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

BERAN, J. *Proposal of New Technology Machining of Parts with Thermal Coating: Master Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2012, 59 p. Thesis head : Petrů, J.

This Master Thesis deals with Proposal of New Technology Machining of Parts with Thermal Coating. First part introduce a thermal coatings technology with a special view to plasma spraying. In the same part are presented basic information machining of thermal coatings. Especially turning and grinding operations. In the practice part of this thesis is described a current technology of turning the coating which is sprayed on the workpiece. There was propose a new technology of machining – grinding. There is a techno - economic evaluation including a calculation of time and cost savings. In conclusion there is analysis of the whole innovation.

# Obsah

<b>Obsah.....</b>	<b>6</b>
<b>Seznam použitých značek a symbolů.....</b>	<b>8</b>
<b>Úvod.....</b>	<b>10</b>
<b>1. Vstup do problematiky žárových nástřiků .....</b>	<b>11</b>
1.1. Princip žárového nástřiku.....	12
1.2. Základní metody žárového stříkání .....	13
1.3. Plazmový nástřik .....	13
1.4. Materiály pro žárové nástřiky .....	15
1.5. Cermety .....	15
<b>2. Obrábění žárových nástřiků .....</b>	<b>16</b>
2.1. Soustružení .....	17
2.2. Broušení .....	18
<b>3. Vstup do řešené problematiky .....</b>	<b>21</b>
3.1. Firma Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. ....	21
3.2. Obráběný dílec .....	22
3.3. Výroba dílce .....	24
3.4. Charakteristika nástřiku METCO 81 VF-NS .....	25
<b>4. Popis stávající technologie obrábění.....</b>	<b>26</b>
4.1. Obráběcí stroj .....	27
4.2. Řezný nástroj.....	28
4.3. Řezné podmínky.....	28
4.4. Sled operací .....	29

4.5. Kontrola povrchu.....	30
4.6. Opravný proces .....	31
4.7. Kontrola povrchu po opravném procesu .....	33
4.8. Zhodnocení.....	33
<b>5. Návrh nové technologie obrábění .....</b>	<b>35</b>
5.1. Volba obráběcího stroje .....	36
5.2. Návrh nástroje .....	37
5.3. Určení řezných podmínek .....	40
5.4. Sled operací.....	43
5.5. Kontrola povrchu.....	43
5.6. Zhodnocení.....	45
<b>6. Druhá varianta broušení .....</b>	<b>46</b>
6.1. Návrh nového kotouče .....	47
6.2. Kontrola povrchu.....	48
6.3. Vyhodnocení výsledků.....	49
<b>7. Technicko – ekonomické zhodnocení .....</b>	<b>50</b>
7.1. Náklady .....	51
7.2. Úspory .....	52
7.3. Shrnutí.....	54
<b>8. Závěr.....</b>	<b>55</b>
<b>Použitá literatura.....</b>	<b>57</b>
<b>Příloha .....</b>	<b>59</b>

## Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Popis	Jednotka
$a_p$	Hloubka řezu	mm
$d_s$	Průměr kotouče	mm
$d_w$	Průměr součásti	mm
$f$	Posuv na otáčku	mm
$f_r$	Radiální posuv kotouče na otáčku	mm
$n$	Otáčky součásti při soustružení	$\text{min}^{-1}$
$N_{JKN}$	Nové náklady na výrobu 1 kusu	Kč
$N_{JKS}$	Stávající náklady na výrobu 1 kusu	Kč
$N_{NJKP}$	Procent. hodnota úspory nákladů na výr. 1 kusu	%
$n_s$	Otáčky kotouče	$\text{min}^{-1}$
$n_w$	Otáčky součásti při broušení	$\text{min}^{-1}$
$R_a$	Střední aritmetická úchylka profilu	$\mu\text{m}$
$R_z$	Největší výška profilu	$\mu\text{m}$
$t_{ACN}$	Nový strojní čas	min
$t_{ACS}$	Stávající strojní čas	min
$U_{NJK}$	Úspora nákladů na výrobu 1 kusu	Kč
$U_{tAC}$	Úspora strojního času	min
$U_{tACP}$	Procentuální hodnota úspory strojního času	%
$v_c$	Řezná rychlost	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
$v_{fr}$	Obvodová rychlost kotouče	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$v_w$	Obvodová rychlost součásti	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$



<b>Zkratka</b>	<b>Popis</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid hlinitý
APS	Atmosférický plazmový nástřík
CBN	Kubický nitrid boru
CNC	Computer Numerical Control
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Karbid chromu
D-GUN	Detonační nástřík
EDM	Elektrojiskrové obrábění
FEPA	Federation of European Producers of Abrasives
HB	Tvrdost podle Brinella
HV	Tvrdost podle Vickerse
HVOF	High Pressure High Velocity Oxygen Fuel
OP	Opravný proces
OPL	Sekvence operací vedoucí k opravě dílce
RS	Sériový port
S	Soustružení
VBD	Výměnná břitová destička
VPS	Vakuový plazmový nástřík
WC	Karbid wolframu

## Úvod

V technické praxi se technologové setkávají s výrobou, která probíhá za ne zcela optimálních podmínek. Pro splnění zadaných úkolů v požadovaných termínech je nutno co nejrychleji navrhovat výrobní postupy a definovat nejvhodnější podmínky, za kterých budou jednotlivé procesy probíhat. Technologové při návrhu volí způsob, při němž by se nejméně ovlivnil chod okolní výroby v podniku. Musí být zajištěna požadovaná kvalita vyráběného produktu. Nesmějí být opomenuty náklady, které při této výrobě vznikají. Jestli-že však není při zavedené výrobě dlouhodobě dosahováno požadovaných výsledků, ať už z technologického či ekonomického hlediska, je nutno hledat nový způsob, který by v co nejkratším čase, zajistil efektivní a hospodárnou výrobu. V obrábění dochází k těmto situacím často. Obtížnou kategorií při volbě vhodné technologie tvoří žárové nástřiky.

Žárové nástřiky jsou významnou povrchovou úpravou v leteckém a automobilovém průmyslu. Tato technologie zabezpečuje vynikající vlastnosti vyráběných součástí. Pro správnou funkci povlakovaných dílců bývají povrchy dále upravovány. Jedním z několika způsobů je třískové obrábění. Zde je nutné předem určit vhodné řezné podmínky. potřebné údaje nejsou volně dostupné a musí je ve většině případů doporučit výrobce nástřiku. I tyto hodnoty se však mohou lišit od optimálních a proto firmy, zabývající se touto problematikou, hledají vhodné technologie, které by zajistily efektivní výrobu.

Tato práce se skládá z několika částí. V první (teoretické) je na základě dostupné literatury popsána problematika žárových nástřiků, včetně rozdělení technologie a principu plazmového nástřiku. Dále je popsána problematika mechanických úprav, se zaměřením na třískové obrábění. Druhou polovinu práce tvoří praktická část. Jsou zde informace o obráběné součásti a plazmovém nástřiku, který je na ní nanesen. Poté je popsána původní stávající metoda soustružení včetně řezných podmínek. Po analýze výsledných dat, které byly získány při kontrole vyrobených součástí, byla navržena nová technologie, která měla zajistit efektivní výrobu součástí se zaměřením na požadovanou kvalitu povrchu. Nakonec byly vypočítány úspory strojních časů a cenových nákladů.

# 1. Vstup do problematiky žárových nástřiků

Žárové nástřiky představují moderní technologii pro vytváření funkčně efektivních povlaků, jenž má velké výhledy do budoucna. Jejich uplatnění je možno nalézt v mnoha průmyslových odvětvích. Tyto flexibilní, vysoce kvalitní a ekonomické technologie umožňují optimálně přizpůsobit povrchové vlastnosti součásti provozním podmínkám. Tímto dochází k prodloužení životnosti, zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti součástí. Významná je i lepší ekonomika výrobního procesu. [1]

Důležitým aspektem pro výběr vhodné technologie žárově stříkaných povlaků je především ochrana povrchu, kdy je kladen důraz na tradiční aplikace žárově stříkaných povlaků. V současné době se ale objevují aplikace používající povlaky jako funkční povrchy nabízející materiálovým inženýrům alternativu mezi používáním tenkých vrstev a objemových materiálů. [1]

Technologie žárových nástřiků zastávají důležitého uplatnění v řadě průmyslů, jako jsou energetický, automobilový, letecký, chemický, petrochemický nebo lékařství. Tyto technologie žárově stříkaných povlaků jsou nezastupitelné a sehrávají klíčovou roli při výrobě. Jejich praktický dopad na kvalitu výrobků spočívá v technickém a ekonomickém zvyšování užitečných vlastností jak v prvovýrobě, tak i v oblasti renovací. Mezi důležité vlastnosti žárových nástřiků patří: [1]

- odolnost proti mechanickému opotřebení (abraze, eroze, kavitace),
- vynikající tribologické vlastnosti (samomazné, kluzné, těsnící povlaky),
- odolnost proti oxidaci, korozi a proti působení agresivního chemického prostředí,
- odolnost proti extrémně vysokým teplotám,
- doplnění rozměrů, doplnění chybějícího materiálu,
- elektroizolační a elektrovodivé povlaky,
- biokompatibilní, zdravotně nezávadné povlaky,
- povlaky se speciálními fyzikálními vlastnostmi.



Technologie žárového nástřiku jsou vysoce progresivním a efektivním výrobním procesem, který je schopen plnit ty nejnáročnější požadavky kladené na funkční povrchy. Prioritní uplatnění těchto technologií spočívá ve výrobě a generálních opravách leteckých turbínových motorů, popř. stacionárních turbín. Z těchto oblastí se dále dostávají do jiných strojírenských oborů, zejména automobilového průmyslu, ale i jiných odvětví, např. chemického průmyslu, polygrafického a textilního průmyslu. Výhody žárových nástřiků lze stručně shrnout takto: [5]

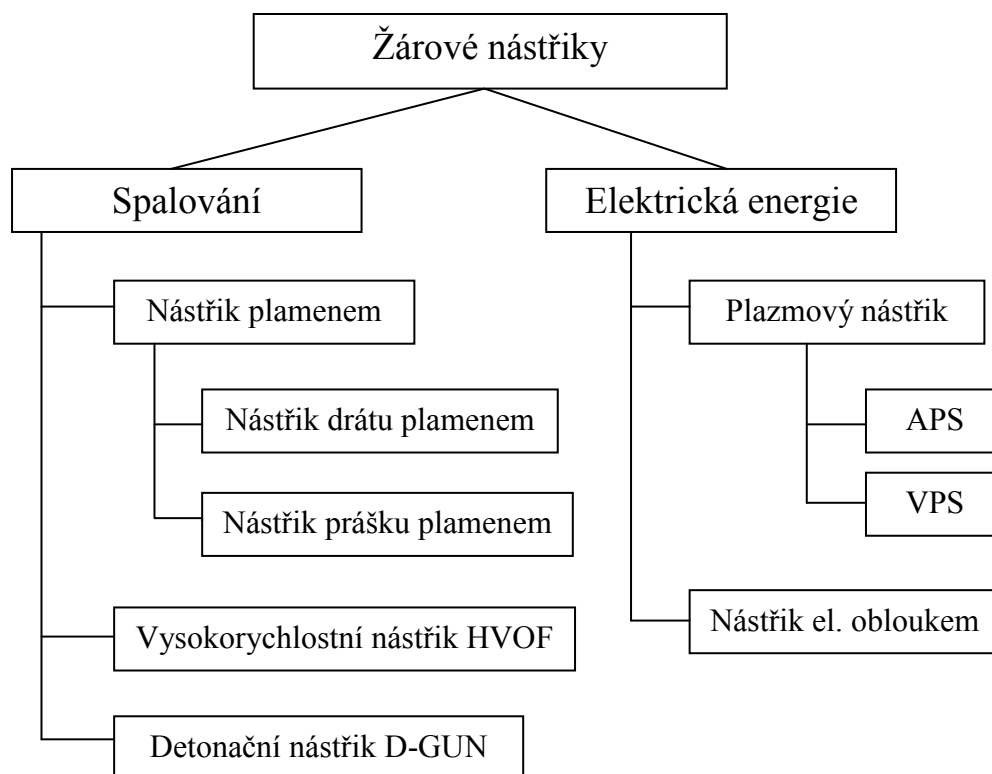
- zlepšení korozní odolnosti součástí (všechna média a rozsahy teplot),
- zvýšení odolnosti proti opotřebení (abraze, eroze, fretting, kavitace),
- zvýšení únavové pevnosti součástí,
- snížení tepelného namáhání součástí (tepelná izolace),
- dokonalé utěsnění vzduchoplynových soustav a zvýšení jejich účinnosti,
- ekonomické úspory (náhrada drahých materiálů).

### 1.1. *Princip žárového nástřiku*

Žárový nástřik je částicový proces, při kterém dochází k vytváření povlaků. Nanášený materiál je ve formě prášku nebo drátu přiváděn do zařízení, ve kterém dojde k jeho natavení a urychlení ve směru k povlakované součásti. Po dopadu na substrát dojde k výraznému plošnému rozprostření částice a k jejímu rychlému utuhnutí. Tímto je vytvořen povlak, který má charakteristickou lamelární strukturu a specifické vlastnosti. Úplného difuzního spojení nastříkaného materiálu s podkladem se ale nedosáhne. Přílnavost nastříkaných částic obvykle vzniká mechanickým přilnutím a upevněním nastříkaných částic, jejich ochlazením a smrštěním, jakož i fyzikální cestou. Ke spojení nastříkaného povlaku s podkladem tavením či difuzí může dojít (např. u natavitelných slitin nebo vakuově stříkaných povlaků), jakmile během stříkání nebo po něm proběhne tavení nebo difuzní tepelné zpracování povlaku. Teplota součásti v místě nástřiku zůstane hluboko pod teplotou tavení a zpravidla nepřesáhne teplotu vyšší než 150°C. Nanesené povlaky mají tloušťku obvykle větší než 50 μm. [1], [7], [9]

## 1.2. *Základní metody žárového stříkání*

K natavení přídavného materiálu je nutná tepelná energie. Jejím zdrojem může být spalovací proces nebo elektrická energie. Jednotlivé druhy žárového nástřiku lze rozlišit podle konstrukce zařízení a použitého zdroje energie. [1]



Obr. 2.1 Základní rozdělení žárových nástřiků

## 1.3. *Plazmový nástřik*

Tato práce je zaměřena na technologii obrábění povlaku, který je nanesen plazmovým stříkáním. Plazmový nástřik je charakterizován jako technologický proces, při němž hoří elektrický oblouk mezi vodou chlazenou wolframovou katodou a válcovou měděnou anodou, která tvoří zároveň trysku plazmového hořáku. Elektrický oblouk hoří v plazmovém plynu (většinou argon nebo jiný inertní plyn s několika procenty plynu zvyšujícího entalpii plazmatu, např.  $H_2$ ,  $He$ ,  $N_2$ ).



Plazmový plyn je napouštěn axiálně do hořáku, na jehož druhém konci vystupuje plazma s vysokou teplotou (až 30 000°K) a entalpií. Do něj se pomocí nosného plynu přivádí nanášený materiál. Vysoká teplota plazmatu je v některých případech nevýhodou, protože může způsobit oxidaci, změnu fázového složení nebo vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu v průběhu nástřiku. Vlastnosti takto vytvořeného povlaku se poté mohou výrazně lišit od předpokládaných. Hlavní rozdíl v technice nanášení povlaků plazmovou metodou je v chemické aktivitě prostředí, kterému je vystaven nanášený materiál. Nevýhodou této technologie jsou především značné investiční náklady na zařízení a následně náklady na jeho provoz. [1], [7]

Pro dosažení extrémně vysoké hustoty, přilnavosti a čistoty povlaků je možné provádět plazmový nástřik v uzavřené komoře za sníženého tlaku VPS (obvykle 0,005-0,02 MPa). Povlaky lze nanášet s vlastnostmi, které jsou pro ně navrženy, protože vlastnosti přídavného materiálu zůstávají zachovány. Touto metodou lze nanášet aktivní kovy, jako je např. titan. Povlak má vyšší adhezi, kohezi a hustotu, neboť je rychlost letících částic vyšší než za normálního tlaku atmosféry. [11]

Zařízení pro plazmový nástřik ve vakuu se od konvenčního zařízení pro plazmový nástřik liší hlavně dálkovým ovládáním pistole, vakuovým systémem a chlazením nástřikové komory. V porovnání s atmosférickým plazmovým nástřikem (APS) vykazuje VPS nástřik tyto rozdílné procesní charakteristiky: [1]

- širší a delší proud plazmatu,
- čistší rozhraní mezi povlakem a substrátem,
- povlak bez oxidických vměstků,
- vysoká hustota povlaku, blízká hustotě objemového materiálu,
- větší možná tloušťka nástřiku ( $> 25$  mm),
- možnost předehřevu povlaku i substrátu na vysoké teploty.

Tyto jevy jsou způsobeny rozšířením a prodloužením proudu plazmového plynu ve vakuu, než je tomu při APS. Širší a delší plazmový proud umožňuje prodloužení depoziční vzdálenosti. [11]



### 1.4. *Materiály pro žárové nástřiky*

Při realizaci žárových nástřiků jsou požadavky kladené na funkci povlaku, např. odolnost proti opotřebení, korozivzdornost, tepelná odolnost apod. zajištěny použitím vhodného typu přídavného materiálu. Metoda plazmového nástřiku umožňuje použití pro nástřik prakticky všechny materiály, které jsou stabilní až do teploty tavení. Technologie je vhodná pro nástřik kovů, většiny keramik a cermetů. Většina zařízení používá přídavné materiály ve formě prášků nebo drátů.

Stříkané povlaky lze podle materiálu rozdělit do následujících skupin: [1]

- **Kovy a jejich slitiny** (molybden, nikl, kobalt, titan),
- **Oxidické keramiky** ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),
- **Karbidy** ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ) - odolávají vysokoteplotnímu opotřebení nad 500 °C,
- **Cermety** ( $\text{WC} - \text{Co}$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}_2 - \text{NiCr}$ ).

### 1.5. *Cermety*

V diplomové práci je řešena problematika obrábění nástřiku vyrobeného z prášku skládajícího se ze dvou odlišných materiálů. Jde o kompozitní materiál složený z kovu a keramiky. Název CERMET vznikl složením prvních tří hlásek slov „CERamics (keramika)“ a „METal (kov)“. Má tak vyjadřovat materiál, jehož mechanické vlastnosti vykazují výhodnou kombinaci, přičemž keramika vyniká vysokou teplotní odolností a tvrdostí, naopak kov je charakteristický svou houževnatostí. Propojením těchto materiálů vznikne cermet s optimálními vlastnostmi. Kovovou matici tvoří kovy jako je nikl, molybden, kobalt, chrom a jejich slitiny. Keramiku nejčastěji zastupují karbidy wolframu, chrómu nebo titanu, které zajišťují odolnost proti opotřebení. Karbidy chrómu  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  jsou spojené se slitinou NiCr 75/25, které je v povlaku 7 až 50%. Typické aplikace jsou tvářecí zápustky, hydraulické ventily, tepelně namáhané strojní součásti pro automobilový a letecký průmysl, řezné nástroje. Jsou vhodné jako ochrana proti opotřebení hliníkových součástí. Také se používají na vnější části spalovacích komor, vystavené kontaktnímu namáhání, popř. erozi. [4], [14]



## 2. Obrábění žárových nástřiků

Součásti s žárovými nástřiky mají své unikátní vlastnosti, které mohou být naplno využívány až po dodatečných nebo konečných úpravách naneseného povlaku. Při opracování žárově stříkaných povlaků je nutné brát v úvahu zejména vlastnosti lamelární struktury, která se značně liší od struktury téhož materiálu v litém nebo tvářeném stavu. Postupy závěrečných úprav, které jsou vhodné pro lité nebo tvářené materiály, by žárově stříkané povlaky pravděpodobně poškodily. [8]

Povlaky lze dodatečně upravovat mechanicky, chemicky nebo tepelně:

- **mechanicky** – třískové obrábění, kuličkování, kartáčování aj.,
- **chemicky** – utěšňování, chemická konverze, nanášení nátěru,
- **tepelně** – přetavení, difuzní žíhání, izostatické lisování za horka.

Z uvedených důvodů nelze u žárově stříkaných povlaků vzhledem k jejich odlišným vlastnostem použít společné základy postupů třískového obrábění. Vytvářené povlaky jsou relativně tenké a určitým způsobem je kus umění zhotovit jak kvalitní povlak tak zabezpečit kvalitní obrobení, aby daná součást fungovala, jak je konkrétní úpravou zamýšleno.

Povlaky z cermetů jsou charakterizovány vysokou odolností proti korozi a opotřebením za vysokých teplot. Vytvářejí otěruvzdorné, tvrdé a pevné povrchy. Tyto povrchy většinou nevyžadují další dokončovací úpravy. Jestliže je dokončování vyžadováno, je to především z důvodu zajištění lepší kvality povrchu. Jako vhodné dokončovací úpravy je vhodné volit takové, které zajistí požadovanou kvalitu povrchu a které nejméně ovlivní konečnou cenu vyráběného produktu. [7]

Tvrdé žárové nástřiky jsou vysoce těžkoobrobitelné materiály. Každá firma se snaží vyvíjet vlastní optimální způsob jak tyto povlaky co nejefektivněji obrábět. Je to jejich takzvané know-how, a je obtížné zjistit konkrétní přesné informace o této technologii z volně dostupné literatury.



## 2.1. Soustružení

Žárově stříkané povlaky lze soustružit tehdy, splňuje-li obráběný materiál určité parametry. Jsou to především jeho specifické vlastnosti např. jeho struktura, tvrdost nebo postup předchozího stříkání. V žárově stříkaných povlacích se vyskytuje řada různých tvrdých fází, např. oxidy, karbidy, boridy, silicidy a další. Struktura žárově stříkaných povlaků je více či méně heterogenní, anizotropní, s mikroskopickými póry a mikrotrhlinami, bez ohledu na způsob stříkání a na použitý materiál. Proto se odebíraná tříska chová jako např. při obrábění šedé litiny. Soustružení proto není příliš vhodné pro obrábění těchto tvrdých materiálů. Při soustružení je nutno odebrat hrubou povrchovou vrstvu a dosáhnout tak optimálního povrchu součásti. Z toho důvodu je nutné těmto faktorům věnovat pozornost při volbě řezných podmínek a při volbě geometrie ostří nože, aby se předešlo velkému opotřebení hřbetu. [8], [2], [20]

Řezné rychlosti, posuvy, tvary břitů soustružnických nožů a volba vhodného stroje jsou určovány podle vlastností obráběného materiálu. Při obrábění povlaků z natavitelných slitin, které byly pro získání hutné struktury přetaveny, lze použít řeznou kapalinu, aby se zabránilo přehřátí, to však neplatí při používání řezných nástrojů z CBN. [8]

Při soustružení je nutné použít řezné nástroje tvrdší než je materiál obráběného povlaku. Volba destičky a řezné podmínky jsou doporučovány výrobcem konkrétního materiálu pro žárový nástřik. V praxi se ale tyto podmínky nemusejí vždy shodovat s doporučenými a musejí se hledat ty optimální, které by zabezpečily snadné a efektivní obrobení nástřiku. Obráběcí stroj musí mít tuhé mechanické vlastnosti zabraňující chvění a případným nežádoucím vlivům na tvar a rozměr obrobku. [2]

Při výběru soustružnického nože, resp. VBD je důležité postupovat opatrně, neboť v důsledku výskytu tvrdých fází v žárově stříkaných povlacích a extrémního zpevnění některých nanášených částic je soustružnický nůž mnohem více zatížen než je tomu při obrábění litého nebo kovaného materiálu stejného nebo podobného složení. Z tohoto důvodu je nezbytné použít slinuté karbidy a keramické řezné materiály.

Naproti tomu žárově stříkané povlaky hliníku nebo mědi lze hospodárně soustružit nástroji z rychlořezné oceli. Žárově stříkané povlaky o tvrdostech větších než 700 HV (60 HRC) umožňují přijatelné soustružení nástroji z polykrystalického kubického nitridu bóru (CBN), slinutého na tělese ze slinutého karbidu. [8]

Pro povlaky z keramických a cermetových kompozitních materiálů je volba materiálu nástroje obtížná. Většinou se volí VBD z Kubického nitridu boru, polykrystalického diamantu nebo povlakovaného slinutého karbidu. Další možností je slinutý karbid s povlakem. [8]

Při volbě nástroje je nutné brát ohled i na řeznou rychlost. Řezné rychlosti pro žárově stříkané povlaky jsou různé. Vzhledem k výskytu tvrdých fází jsou nižší než u homogenních materiálů a vyžadují ostré řezné nástroje s poloměrem řezné hrany R 0,4 mm až 1,2 mm. Při volbě optimálních řezných podmínek se doporučuje provést zkušební řезы. Příčný posuv na jednu otáčku musí řádově odpovídat průměru částic žárově stříkaného povlaku. [8]

## 2.2. *Broušení*

Na kvalitu funkčních ploch součástí z těžkoobrobitelných materiálů jsou zpravidla kladeny vysoké požadavky, jak z hlediska geometrické přesnosti, tak z hlediska jakosti (drsности) povrchu. Povrchová vrstva broušené plochy nesmí být porušena mechanickými, fyzikálními ani chemickými účinky, které provázejí proces broušení těžkoobrobitelných materiálů a jež zpravidla zvyšují vnitřní pnutí v hmotě obrobku a podporují vznik trhlin. [21]

Technologie broušení je pro finální úpravu supertvrdých nástřiků nejvhodnější. Doporučují je jak výrobci materiálů pro nástřiky, tak technologové, kteří se s tímto problémem setkávají v praxi. Při obtížné obrobitelnosti, jejíž příčiny jsou popsány v předchozí kapitole, je tato technologie preferována před soustružením a ostatními třískovými konvenčními metodami obrábění. Brousit lze všechny žárově stříkané povlaky.



Namáhání žárově stříkaného povlaku při broušení je nižší než při soustružení. Je nutno dávat přednost broušení za mokra před broušením za sucha, aby se zabránilo přehřátí žárově stříkaného povlaku i základního materiálu zpracovávaného předmětu. Mokré broušení je také preferováno z důvodu možnosti volby většího druhu brusiva a brusných kotoučů. [8], [2]

Pro zabránění pronikání řezné kapaliny na rozhraní povlaku s podkladem je vhodné povrch nástřiku utěsnit. Je to z důvodu možných korozních problémů. Minimalizuje se tím také vznik úlomků při broušení, které mohou znečistit vratnou řeznou kapalinu. Utěšňování před broušením bývá praktikováno i u keramických povlaků, aby se předešlo vzniku nevzhledných skvrn, způsobených vnikáním řezné kapaliny do povlaku.[8]

Výrobci prášků a dalších materiálů určených pro nástřiky ve většině případů doporučují řezné podmínky výhradně pro broušení. Teprve z těchto se vychází při hledání optimálních řezných podmínek pro ostatní technologie obrábění jako je soustružení, nebo frézování. Brousit lze jediné na tuhých výkonných obráběcích strojích za použití vhodného nástroje. Pro broušení tvrdých materiálů jsou nejčastěji používány brousící kotouče z diamantu.

Broušení je tradiční metoda obrábění, avšak při broušení součástí s žárovými nástřiky z tvrdých materiálů, jako jsou cermety, je nutno dodržovat následující zásady: [2]

- Při broušení tvrdých povlaků jsou brusné kotouče vysoce zatěžovány. Proto je nutné použít měkkého kotouče s jemným zrnem.
- Používat malou hloubku řezu z důvodu vzniku nadměrného tlaku na kotouč, který může způsobit praskání, odštípnutí a následné vytrhnutí povlaku.
- Nevyjiskřovat při finální operaci z důvodu možnosti spálení povrchu obrobku.
- Průběžně kontrolovat stav kotouče – opotřeбенý kotouč ihned vyměnit.
- Při broušení cermetových nástřiků je doporučováno použití výhradně diamantových kotoučů a vhodného chladicího a mazacího média.

Pro povlaky z tvrdých materiálů se tedy nejčastěji používají brusné kotouče z diamantu. Tvary brusných kotoučů jsou různé podle geometrie broušené součásti. Diamantové brusné kotouče jsou určeny především k broušení slinutých karbidů (SK), keramiky, cermetů, skla, kamene a obdobných materiálů. Diamantové kotouče nejsou vhodné k broušení ocelí a měkkých houževnatých materiálů (dochází k zanášení brusné vrstvy a k ztrátě brousících vlastností kotouče).

Efektivnost využití diamantových kotoučů ve značné míře závisí na jejich správném výběru a způsobu použití. Diamantové kotouče jsou dodávány s pryskyřičnými a kovovými vazbami (pojivy). Kotouče s pryskyřičnými vazbami se používají k polohrubovacímu a dokončovacímu broušení s chlazením i bez chlazení. Kotouče s kovovými vazbami se používají především pro hrubovací broušení a všude tam, kde je požadovaná vysoká stálost tvaru diamantové vrstvy. Diamantové kotouče fungují lépe za mokra. Voda brání přehřátí, výrazně snižuje množství škodlivého prachu a pomáhá odstraňovat materiál z řezu. Životnost kotouče při broušení za mokra je delší. Brusné kotouče jsou normalizovány dle normy ISO 6106 (FEPA).



*Obr. 3.1 Diamantový kotouč od firmy WINTER [22]*



### 3. Vstup do řešené problematiky

Diplomová práce byla vypracována ve spolupráci s firmou Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. Veškeré praktické zkoušky, konzultace, provádění experimentů a výroba součástí probíhaly zde. Úkolem bylo vytvořit návrh nové technologie pro obrábění součástí, na které byl plazmovým nástřikem nanesen cermetový povlak. Bylo důležité, aby nebyl žádným způsobem narušen chod výroby. Realizace experimentů obnášela značná omezení, neboť bylo nemyslitelné, aby při nesprávném nastavení, došlo k výrobě špatného kusu. Hrozilo vysoké riziko zvýšení nákladů na výrobu součástí. Nebyly vyrobeny žádné pokusné vzorky a proto všechna měření a hodnocení probíhaly na hotových kusech. Veškeré práce byly uskutečněny za účasti specializovaných pracovníků.

#### 3.1. *Firma Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.*

Areál společnosti sídlí v Hlubočkách – Mariánském Údolí u Olomouce a je v současnosti využíván nadnárodní společností Honeywell, Inc. se svým hlavním sídlem v USA, v Morris Townu, New Jersey.

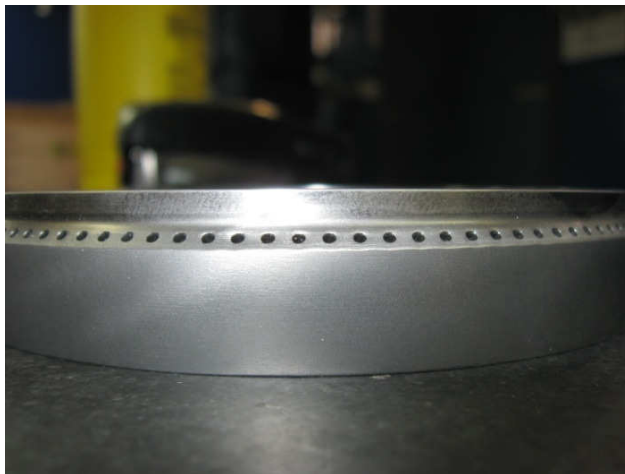
V areálu se vyrábějí, opravují, a také repasují plechové a žárové díly leteckých turbínových motorů a výrobky z nerezavějící oceli a speciálních slitin (niklových, hliníkových, kobaltových, titanových). Výrobky společnosti Honeywell lze nalézt v mnoha dopravních letadlech typu Boeing a Airbus, v obchodních letadlech typu Dassault Falcon, Cessna Citation a Learjet, stejně jako v helikoptérách a dalších. Velká pozornost je věnována zlepšování pracovního prostředí, vybavení pracovišť, ochraně zdraví, bezpečnosti práce a ochraně životního prostředí. Mimo klasické způsoby výroby jako je obrábění, tváření a svařování se zde používají jedinečné technologie jako vakuové tepelné zpracování, pájení, EDM, galvanické a chemické procesy, laserové obrábění, řezání vodním paprskem a různé způsoby testování.



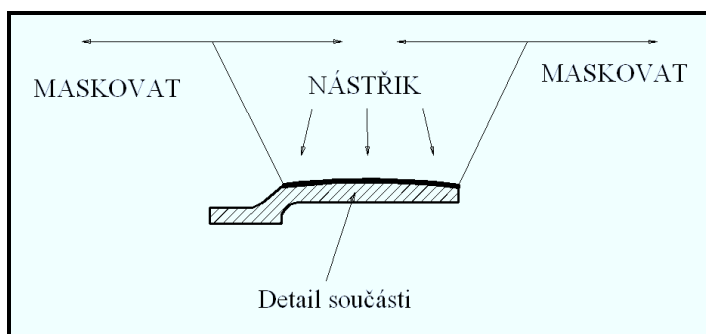
Firma Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. je dynamicky se rozvíjející společnost, která nabízí pracovní příležitosti jak pro absolventy bez praxe, tak pro kvalifikované odborníky zejména z oblasti strojírenství. Spokojenost zaměstnanců a jejich profesní růst patří mezi priority vedení společnosti. Jedním z hlavních cílů je stát se nejvyhledávanějším zaměstnavatelem pro špičkové odborníky. Zaměstnancům je proto nabízeno studium anglického jazyka, navštěvování vzdělávacích kurzů a možnost rozvíjet své odborné znalosti a dovednosti. Používají se zde jedinečné technologie, jejichž znalost přispěje k dalšímu profesnímu rozvoji pracovníků. V současné době zde pracuje více než 850 zaměstnanců. [3]

### 3.2. *Obráběný dílec*

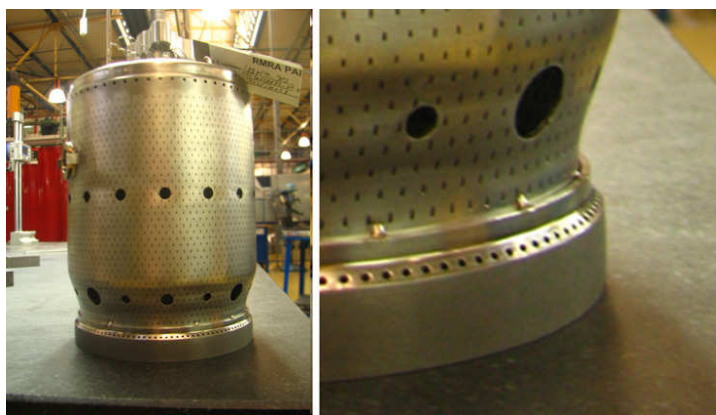
Vybraný dílec je součástí plamence do leteckého motoru. Je to těsnicí kroužek. Jedná se o rotační tenkostěnnou součást, která je vyrobena ze žáruvzdorného materiálu. Na vnější zaoblené ploše je nanesen žárový nástřík. Maximální průměr kroužku na vnější zaoblené ploše činí 124 mm. Důvodem povlakování je správná funkce součásti v provozu, kdy povlakovaná plocha dosedá na protikus, který koná rotační pohyb. Nástřík zabraňuje poškození základního materiálu dílce zatíženého třením, které vzniká mezi těmito dvěma součástmi. Společnost Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. bohužel nebyla schopna poskytnout výkres obráběného dílce z důvodu ochrany firemních dat. Také zde nejsou uvedeny žádné informace o protikusu, ke kterému celá sestava patří. Na obrázku č. 4.1 je vyfocen konečný tvar vyrobené součásti. Obrázek č. 4.2 zobrazuje detail součásti v řezu a na obrázku č. 4.3 lze vidět umístění dílce v celé sestavě plamence.



*Obr. 4.1 Obrobený dílec – těsnící kroužek [3]*



*Obr. 4.2 Detail stěny dílce v řezu s označením aplikace nástříku [3]*



*Obr. 4.3 Umístění dílce v sestavě plamence [3]*

Dílec je vyroben z materiálu HAYNES 230. Jedná se o kovovou žáruvzdornou slitinu používanou převážně v leteckém průmyslu. Na vnějším průměru součásti je nanesen nástřík, který má tloušťku 0,4 až 0,5 mm na stěnu. Při plazmovém stříkání není možno dosáhnout přesně dané tloušťky povlaku, proto se udává rozsah dvou hodnot. Po dokončovacím obrábění zůstane na součásti vrstva nástříku o tloušťce 0,3 mm na stěnu.

Tab. 4.1 Základní informace o součásti

Základní materiál	HAYNES 230
Maximální průměr kroužku	124 mm
Materiál nástříku	METCO 81 VF - NS
Tloušťka povlaku	0,4 – 0,5 mm
Odebíraná vrstva	0,1 – 0,2 mm
Vrstva po obrobení	0,3 mm

### 3.3. *Výroba dílce*

Dle výrobního výkresu byl vytvořen technologický postup. Je složen z velkého počtu operací. Součást, tedy těsnící kroužek, je nutno obrobit zevnitř, z vnějšku, nanést plazmový nástřík, obrobit jej a na závěr jsou po celém obvodu dílce vyvrtány otvory. Hlavní tematika této práce je však věnována pouze části, kdy je obráběn nanesený plazmový nástřík.

V běžných případech se tento nástřík nijak neupravuje. Většinou slouží pouze jako ochrana povrchu základního materiálu proti korozi, vysokým teplotám a dalšímu namáhání. Jestli-že je však nutné dodržet požadovanou kvalitu povrchu, tak je nutné nástřík vhodným způsobem upravit. Jelikož je zde kladen důraz na kvalitní povrch o určité drsnosti, bylo jej nutné upravit mechanicky, a to třískovým obráběním.



### 3.4. *Charakteristika nástřiku METCO 81 VF-NS*

Plazmový nástřik byl proveden ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. Jako materiál byl zvolen prášek s označením Metco 81 VF-NS. Je to směs velmi drobných částíček karbidu chromu a prášku z niklu a chromu. Směs je určena k žárovému stříkání, kdy mezi výrobní požadavky, kladené na opracovávaný předmět, patří vysoká odolnost proti opotřebení při vysokých teplotách. Její chemické složení je 75%  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , 20% Ni a 5% Cr. Teplota tavení se pohybuje okolo 1400°C. Nástřik je charakterizován velkou odolností proti otěru, vysokou pevností, korozní odolností při provozních teplotách 540-815°C. [6]

Metco 81 VF-NS vytváří tenký, hustý, tvrdý a hladký antioxidační povlak. Tento nástřik je natolik kvalitní, že jej není potřeba ve většině případů nijak upravovat. Metco 81 VF-NS se na povrch součásti nanáší metodou plazmového nástřiku systémem Metco Plasma Flame Spray Systems.[6]



*Obr. 4.4 Plazmový nástřik nanesený na funkční ploše dílce [3]*



## 4. Popis stávající technologie obrábění

Diplomová práce se zabývá obráběním tvrdého cermetového povlaku na povrchu součásti. Přestože výrobce povlaku doporučuje jako dokončovací metodu obrábění broušení, bylo zvoleno soustružení. Tento způsob obrábění byl zvolen proto, že pro výrobu rotačních součástí jsou ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. přednostně používána CNC obráběcí centra – převážně soustruhy.

Před dokončovacím obráběním bylo vykonáno několik dalších operací. Jako první byl obroben povrch podkladového materiálu součásti. Poté byl dílec odmaštěn a otryskán. Po těchto procesech byl na označenou plochu plazmovým nástřikem nanesen povlak z materiálu Metco 81VF-NS. Následně byl povrch obráběn technologií podélného soustružení. Bylo nutné zajistit optimální kvalitu povrchu. To vyžadovalo správnou volbu vhodných řezných podmínek. Bylo nutné použít optimální nástroj. V tomto případě byla zvolena výměnná břitová destička, která byla upevněna do nožového držáku.

Touto technologií bylo vyrobeno 20 kusů součásti. Při samotném procesu soustružení se neobjevily žádné problémy. Stroj se choval stabilně a nejevil známky působení negativních vlivů řezného procesu. Břit byl otupován rovnoměrně dle očekávání. Při závěrečné kontrole povrchu však byly v povlaku objeveny trhliny. Při bližším průzkumu se dospělo k závěru, že při soustružení docházelo k odlupování vrstvy nástřiku od základního materiálu součásti.

Odlupování je charakterizováno jako oddělování povlaku od podkladového materiálu v důsledku nedostatečné přilnavosti vyvolané vnějším (tepelným či mechanickým) nebo vnitřním namáháním (vnitřním pnutím způsobeným procesy stříkání). Řešení této problematiky nebylo cílem práce. [9]

V této kapitole je rozebrána metoda soustružení včetně popisu obráběcího stroje, nástroje a volby řezných podmínek. Je zde popsán proces kontroly povrchu obrobeného povlaku. Nakonec bylo provedeno zhodnocení, jehož cílem bylo podrobně přezkoumat problémy, které tato technologie obsahuje.

#### 4.1. *Obráběcí stroj*

Firma Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. disponuje velkým počtem strojů SP 30 od firmy CZ TECH. Jedná se o univerzální CNC soustruh s vlastnostmi, které odpovídají požadavkům na obrábění dané součásti.



*Obr. 5.1 Soustruh SP 30 [17]*

Tab. 5.1 Technické údaje o soustruhu SP 30 [17]

Výrobce	CZ TECH
Označení	SP 30
Rozměry stroje [mm]	2656 x 1225 x 1895
maximální otáčky	3200 min <sup>-1</sup>
maximální výkon vřetena	29 kW
maximální točivý moment vřetena	451 Nm
počet pozic nástrojové hlavy	12 (25 x 25 mm)
rychloposuv v ose X a Z	30 m. min <sup>-1</sup>
maximální posuvová síla v ose X a Z	7000 N
Hmotnost stroje	5800 kg
Standardní řídicí systém	SIEMENS Sinumerik 810 D

## 4.2. Řezný nástroj

Vhodný nástroj byl volen technologem dle jeho zkušeností s obráběním podobných materiálů. Byla použita výměnná břitová destička od firmy **SECO Tools** s označením **VBMT 160404-F1**. Je vyrobena z povlakovaného slinutého karbidu. Cena destičky činila 180 Kč. Jednalo se o výměnnou břitovou destičku se čtyřmi břity. Jedním břitem byl obráběn vždy jen jeden dílec. Destička byla tedy v držáku 4x přetočena po každém obrobení jedné součásti. Poté byla vyměněna za novou. Bylo vypočteno, že cena jednoho břitu činila 45 Kč. Tato cena byla připočtena k nákladům na soustružení. Celkové náklady na soustružení jsou uvedeny v tabulce sledu operací (Tab. 5.4).

Tab. 5.2 Pořizovací náklady břitové destičky

Označení břitové destičky	Cena VBD	Počet břitů	Cena opotřebení jednoho břitu
VBD-VBMT 160404-F1	180 Kč	4	45 Kč

Břitová destička byla upevněna v nožovém držáku C4-SVHBL 270-16 00094225 v nástrojové hlavě stroje SP 30.



Obr. 5.2 Břitová destička VBD-VBMT 160404-F1 [18]

## 4.3. Řezné podmínky

Před obráběním bylo nutné zvolit nejvhodnější řezné podmínky. V bulletinu k žárovému nástřiku jsou tyto podmínky uvedeny pouze pro broušení, které je pro tento materiál preferováno. Dle zkušeností a správného odhadu zodpovědného technologa byla nakonec zvolena řezná rychlost a pracovní posuv, který byl zaznamenán do tabulky č. 5.3. Vycházelo se přitom z doporučených řezných podmínek od výrobce výměnných břitových destiček. Vybrané parametry měly zajistit bezproblémové obrábění.

Tab. 5.3 Řezné podmínky při soustružení

$v_c$	$70 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
$f$	$0,15 \text{ mm}$
$n$	$180 \text{ min}^{-1}$
$a_p$	$0,1 - 0,2 \text{ mm}$

#### 4.4. *Sled operací*

Výroba probíhala na 7 pracovištích, přitom na každém z nich byla provedena jedna operace. V tabulce č. 5.4 je uvedeno, jak dlouho trvala každá operace a kolik na ni bylo potřeba vynaložit finančních prostředků. Časy byly změřeny na jednotlivých pracovištích. Následně byla vykalkulována cena za každou operaci. Kalkulace byla provedena pracovníkem firmy Honeywell Aerospace s.r.o a jeho postup není součástí této práce. Na závěr jsou všechny hodnoty sečteny. Povrch jednoho dílce byl obroben za 187 minut a cena činila 1676 Kč. Jednalo se pouze o obrábění nastříkané vrstvy.

Tab. 5.4 Sled operací při dokončovací výrobě 1 kusu součásti

Č.op.	operace	čas [min]	cena [Kč]
10	Odmašťování	28	1
20	Tryskání před plazmou	20	164
30	Plasma Spray	50	604
40	Ruční práce	32	251
50	Soustružení	41	517
60	Popis dílce	4	31
70	Kontrola	12	108
<b>celkem</b>		<b>187</b>	<b>1676</b>

#### 4.5. *Kontrola povrchu*

Po soustružení byly zkontrolovány rozměry součástí, struktura povrchu se zaměřením na drsnost a kvalita povlakované vrstvy. Přičemž kvalitou zde byla myšlena soudržnost povlaku s podkladovým materiálem. Drsnost je, zároveň s geometrickou přesností, nejdůležitější hodnotou při posuzování kvality obrobené plochy. Měření drsnosti bylo prováděno přístrojem Hommel Tester T 500.

**Hommel Tester T 500** umožňuje snadné a rychlé určení měřených parametrů. Široká nabídka snímačů umožňuje úspěšné řešení nejrůznějších měřicích úloh. Přístroj je mobilní s dobíjecími bateriemi. Vyniká rychlým a přesným měřením při snadné obsluze. Má RS 232 rozhraní pro připojení na PC a dálkové řízení. Rozsah měření je až 160 $\mu$ m. Přístrojem lze měřit Ra, Rz a velké množství dalších parametrů. [16]



*Obr. 5.3 Přístroj na měření drsnosti Hommel Tester T 500 [16]*

Měření probíhalo ve 3 náhodných bodech na povrchu obrobené plochy. Měřila se struktura povrchu v podélném směru. Požadovaná drsnost povrchu byla dle výrobního výkresu Ra 0,8  $\mu$ m. **U všech obrobených kusů byly naměřené parametry Ra stanoveny jako vyhovující.** Naměřené hodnoty zde nejsou uvedeny, neboť je práce zaměřena především na soudržnost naneseného povlaku s podkladovým materiálem.

Kvalita povlaku na dílci byla kontrolována vizuálně. Kontrolor byl řádně obeznámen s danou problematikou a byl schopen posoudit, zda součást vyhovuje, či nevyhovuje zadaným požadavkům. Jestli-že byl povrch součásti poškozen a objevila se odloupnutá vrstva nástřiku, bylo to viditelné pouhým okem a nebylo potřeba použití měřících přístrojů. Z důvodu ochrany firemních údajů, nebylo možné získat fotografie poškozeného nástřiku. Na obrázku č. 5.4 je vidět stejný typ poškození, avšak na jiné součásti.



*Obr. 5.4 Ukázka odloupenutí plazmového nástřiku [3]*

#### **4.6. Opravný proces**

Pro dílce které byly určeny k opravě, byl vytvořen tzv. OPL („opravný list“, neboli sekvence operací vedoucí k opravě dílce). Opravný list obsahoval jednotlivé operace. Jako první bylo nutno součást zbavit poškozeného nástřiku. Tato vrstva byla odsoustružena až na základní materiál dílce. Jako další následovalo odmaštění a tryskání. Tryskáním byly odstraněny zbytky nástřiku, které nebylo možné obrobit soustružením. Po tomto procesu byla součást otryskána znovu (použitím jiného tryskacího média), aby povrch získal potřebné vlastnosti, které zajišťují důsledné přilnutí žárového nástřiku. Poté byl pomocí plazmy nanesen nástřik a následovala ruční práce, při níž byl nástřik zbaven otřepů a různých nečistot vzniklých při plazmovém povlakování. Dílec byl tedy připraven k závěrečnému dokončení. Tento proces probíhal stejným způsobem jako před opravnými operacemi.

Byly nastaveny dané řezné podmínky a obroben nástřík na požadovaný rozměr. Jestli-že obrobený povrch při kontrole splňoval požadované vlastnosti, byl dílec odeslán k dalšímu obrábění a následné montáži. Pokud bylo zjištěno, že je nástřík opět poškozen, bylo nutné celý opravný proces opakovat.

Oprava byla velice nákladná. Součást musela být opracována na strojích, které již mohly být využity k další výrobě jiných součástí. Při soustružení bylo nutno použít nové břitové destičky a metoda plazmového nanášení povlaků je drahá, jelikož tento prášek patří mezi kvalitní a relativně cenné materiály.

Součást nebylo možné opravovat při každém zjištění poškozeného povrchu, neboť při opakovaném opravném procesu docházelo k deformacím celé součásti vlivem působení tepla při žárovém nástříku. Upnutí a vystředění dílce na soustruhu bylo zdlouhavé, neboť dílec byl vyráběn z tenkostěnného materiálu a při nesprávné manipulaci mohlo dojít k jeho poškození. Z těchto důvodů bylo ustanoveno, že u jednoho kusu součásti bude možné provést pouze 2 opravné procesy.

Tab. 5.5 Výrobní postup při opravě poškozeného povlaku

Č.op.	operace	čas [min]	cena [Kč]
10	Soustružení	25	288
20	Odmaštění	28	1
30	Tryskání starého nástř.	20	130
40	Tryskání před plazmou	20	164
50	Plasma Spray	50	604
60	Ruční práce	32	251
70	Soustružení	41	517
80	Popis dílce	4	31
90	Kontrola	12	108
<b>celkem</b>		<b>232</b>	<b>2094</b>





Sled operací nezahrnuje pouze samostatnou opravu, ale i následné dokončovací obrábění a závěrečnou kontrolu dílce. Z tabulky vyplývá, že oprava nástřiku i s následným dokončením trvala 232 minut při celkové ceně 2094 Kč.

#### 4.7. *Kontrola povrchu po opravném procesu*

Po opravení byla znovu zkontrolována kvalita povrchu. Postup byl stejný jako při prvním měření. Nejdříve byl zkontrolován vzhled nástřiku, přičemž se hledaly stopy po jeho odloupení. Poté byla naměřena drsnost pomocí přístroje Hommel Tester T 500. Jestliže byla drsnost povrchu opět vyhovující a v povlaku nebyly nalezeny stopy po odloupení, byla součást připravena k dalším výrobním operacím na dalších pracovištích. V tomto případě následovala operace, kdy byly vyvrtány otvory po obvodě celého vyráběného dílce dle technologického postupu.

#### 4.8. *Zhodnocení*

Bylo obrobena 20 dílců. Z dvaceti součástí byly 2 obrobena napoprvé, 14 bylo jednou opravováno a 4 kusy byly v pořádku až po druhém opravném procesu. Žádný dílec nebylo nutné vyrábět celý znovu. Drsnost povrchu byla u každé součásti vyhovující, což znamená  $Ra\ 0,8\ \mu m$  podle výkresu součástí. Výsledky nebylo nutné uvádět. V tabulce č. 5.5 je souhrn výroby všech soustružených dílců. Podrobný rozbor je uveden v příloze č. 1.

Tab. 5.5 Výsledné zhodnocení výroby (S-soustružení, OP-opravný proces)

Počet dílců	S	OP	OP
2	OK	-	-
14	Odlupování	OK	-
4	Odlupování	Odlupování	OK



Nabízí se otázka. Proč technolog nepřerušil výrobu hned po zjištění nevyhovujícího povrchu u prvních kusů? Výroba mohla být pozastavena a začal by se hledat nový způsob, jak obrobit součást, aniž by se následně musela opravovat. Nemusela by se riskovat výroba špatného kusu a následné zvýšení nákladů díky více operacím při opravách. To by však znamenalo, že zastavením výroby by nebyly dílce zákazníkovi předány včas. Ve strojírenském průmyslu, zvláště pak v letectví, je důležité, aby se vyrábělo kvalitně a rychle, to vše ale za přijatelnou cenu. V tomto případě bylo nutné zvážit všechna pro a proti. Na jedné straně stála předpokládaná ztráta zákazníka, na druhé vyšší náklady na výrobu. Bylo rozhodnuto, že se budou dílce obrábět dále stejným způsobem, tedy soustružením, neboť rychlost a kvalita byla prioritou. Náklady byly vyšší, avšak prodejní cena výrobku musela být zachována. Ztráty jenž vznikaly díky opravám byly přijatelné s podmínkou, že začne být vyvíjena nová metoda, která zajistí způsob výroby zaručující snadné a bezproblémové obrábění.

### **Výhody**

Výhodou této metody byla vysoká produktivní rychlost a nízká cena, při vyrobení součásti napoprvé. Další kladnou vlastností soustružení bylo dodržení předepsané drsnosti povrchu nástřiku. To bylo dáno optimální volbou nástroje a řezných podmínek.

### **Nevýhody**

Zásadní nevýhodou této technologie bylo, že firma nebyla ve většině případů schopna zaručit vyrobení součásti napoprvé. Při soustružení docházelo k nežádoucím procesům mezi nástrojem a povrchem obráběné součásti. Docházelo k odtrhávání povlaku od základního materiálu. Součást s poškozenou povrchovou vrstvou bylo nutno opravit. Tento proces prodlužoval celkový výrobní čas. Navíc po druhé neúspěšné opravě by byl dílec označen jako špatný kus, a bylo by ho nutné vyrobit celý znovu. To si firma nemohla dovolit. Došlo by tím k rapidnímu zvýšení nákladů na celou výrobu.

Jestliže byly k původnímu soustružení připočteny dva opravné procesy, tak výsledný čas celkové dokončovací výroby činil 651 minut. Cena za tento proces byla stanovena na 5864 Kč. Vzhledem k prodejní ceně součásti zákazníkovi bylo nemožné postupovat tímto směrem a bylo nezbytně nutné hledat jiný způsob výroby.



## 5. Návrh nové technologie obrábění

V některých případech je možné jednu součást obrábět více způsoby při dosažení stejných, ne-li lepších výkonů. Novou technologií bylo nutné navrhovat již během soustružení. Nebylo možné výrobu přerušit a čekat na vyřešení problému. Bylo nutné, aby byl přechod na novou technologii plynulý. Tato technologie musela splňovat požadavky kladené na tvar, rozměry a kvalitu povrchu součásti. Úkolem návrhu bylo zamezit odlupování povlaku od základního materiálu. Jednalo se o nutné zkvalitnění povrchu obrobeného materiálu a bylo nutné hledat takový způsob obrábění, který by bezpečně zajistil efektivní a hospodárně výhodné zhotovení výrobku.

S ohledem na co nejmenší zásah do vedlejší výroby při volbě pracoviště, se nabízela možnost přechodu k broušení. Broušení je výhodný hospodárný způsob obrábění tvrdých těžkoobrobitelných materiálů. Jedná se o hlavní dokončovací metodu obrábění mnohobřitým nástrojem s geometricky nedefinovatelnými řeznými hranami, kterými jsou zrna brusiva spojená pojivem. Lze jím dosáhnout velmi jakostního povrchu a velké geometrické přesnosti tvaru i rozměrů. [10]

Podstata broušení spočívá v tom, že brusivo v zrnech odřezává svými břity maličké třísky z broušeného povrchu. Zrna nemají nejvhodnější řezné úhly. Většinou mají záporný úhel čela. Z teorie obrábění velkými rychlostmi je však známo, že velká řezná rychlost vyvažuje nepříznivé vlivy záporných úhlů čela. Protože pak brusné nástroje pracují většinou velkou řeznou rychlostí, řezou jejich zrna dobře i při nevhodně postavených břitech. [13]

Broušením lze ubírat pouze menší množství materiálu. Je proto používáno převážně pro závěrečné dokončovací práce. Tuto technologii doporučuje i samotný výrobce prášku pro plazmový nástřik, proto byla tato možnost realizována. Důvodem, proč se součást nebrousila již na začátku bylo, že obráběná plocha má specifický tvar a bylo by nutné vyrobit na zakázku speciální brusný kotouč, což bylo, jak se nyní ukázalo, nevyhnutelné.

Předpokladem broušení byla záruka obrobení součásti bez následných zbytečných oprav opracovaného povrchu. Bylo však nezbytné zvolit optimální řezné podmínky včetně volby vhodného obráběcího stroje a nástroje.

### 5.1. *Volba obráběcího stroje*

Volba vhodného stroje mnohdy není jednoduchá. Složitost spočívá především v objektivním posouzení vlivu jednotlivých podmínek, které budou ovlivňovat efektivní splnění především požadavků jakosti výroby, produktivity a hospodárnosti výroby. Základní hlediska jsou: geometrický tvar obráběných ploch, rozměr a hmotnost obrobku, požadovaná a dosahovaná kvalita obrobených ploch, dávka – tj. počet obrobků, obráběných v jednom sledu.

Pro výrobu byla zvolena CNC bruska **Springfield 25 E – CROWN**. Disponuje otočným stolem s upínacími drážkami ve tvaru T. Stroj má vysokou tuhost a přesnost a ve firmě nachází vysoké uplatnění. Patří již sice ke starším obráběcím strojům, avšak stále plní svou plnohodnotnou funkci. Bruska je americké výroby a hodnoty nastavení stroje bylo nutno převádět do metrického systému.



*Obr. 6.1 Bruska Springfield 25E – CROWN [15]*

Tab. 6.1 Technické údaje k brusce Springfield 25E – CROWN [15]

Výrobce stroje	Springfield
Označení stroje	25 E – CROWN
Rok výroby	1980
Hmotnost stroje	9 000 Kg
Maximální zdvih vřetena	530 mm
Maximální oběžný průměr	900 mm
Typ upínacího zařízení	Otočný stůl s 6 T-drážkami
Max. rychlost posuvu vřetena	3000 mm min <sup>-1</sup>
Max. otáčky stolu	3800 min <sup>-1</sup>
Max. hloubka broušené díry	460 mm

## 5.2. *Návrh nástroje*

Nástrojem k broušení je brusný kotouč. Většinou se skládá ze zrn brusného materiálu stmelených v pevný celek. Může se však jednat i o ocelové těleso (kotouč), na kterém je galvanicky nanesená brousící vrstva. Tvrdost brusných zrn a velké řezné rychlosti umožňuje brousit všechny známé kovové i nekovové materiály. Broušením lze snadno dosáhnout velmi jakostního povrchu a velké geometrické přesnosti tvaru i rozměrů. [14]

Při volbě kotouče hraje hlavní roli brusivo, velikost brusného zrna, tvrdost kotouče, struktura kotouče a pojivo, kterým jsou brusná zrna stmelená.

Parametry se stanovují podle těchto činitelů: [14]

- druh broušeného materiálu a jeho fyzikální vlastnosti,
- způsob broušení s přihlédnutím k tvaru a velikosti styčné plochy kotouče a obrobku,
- tvar broušené plochy,
- drsnost povrchu, jíž se má broušením dosáhnout,
- množství ubíraného materiálu.



Při návrhu brusného kotouče bylo nutno vycházet z mechanických a fyzikálních vlastností, které jsou uvedené v bulletinu k nástřiku Metco 81 VF-NS. Technologem byl navržen hlavní posuvný pohyb směrem k ose obrobku. To znamená, že byl zvolen radiální způsob broušení (zapichování). Obráběná plocha je zaoblená. Rádus činí 62 mm. Kotouč měl odebírat vrstvu 0,1 – 0,2 mm nástřiku.

Zaoblenou plochu nebylo možné obrábět žádným z volně dostupných tvarových brusných kotoučů. Bylo nutno navrhnout speciální kotouč, který by odpovídal zadaným podmínkám a parametrům. Jako výrobce byla vybrána firma WINTER, která se specializuje na výrobu diamantových brusných kotoučů. Firmě byla poskytnuta výkresová dokumentace součásti od firmy Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. Úkolem výrobce bylo dodat takový brusný kotouč, který by zajistil efektivní výrobu součásti se speciálním důrazem na kvalitu obráběného povrchu nástřiku.

Zrnitost kotouče byla volena dle normy FEPA. Touto normou se musí řídit všichni výrobci brusných kotoučů. V Tab. 6.2. je přehled doporučené zrnitosti pro vybrané hodnoty drsnosti při základních dokončovacích operacích.

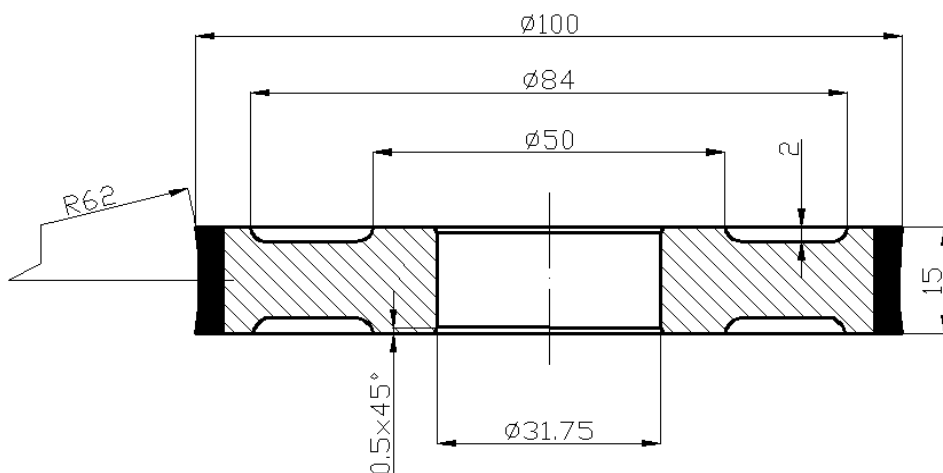
Tab. 6.2 Přehled doporučené zrnitosti dle normy FEPA (ISO 6101) [23]

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Použití	Zrnitost FEPA
1,2	Výkonné broušení a hrubování, kde je žádán především vysoký výkon broušení	D 213
		D 151
0,8	Výkonné broušení a hrubovací operace	D 126
		D 91
0,4	Střední broušení, ostření řezných nástrojů	D 76
		D 64
0,2	Dokončovací broušení	D 54
0,1	Lapování, jemné broušení	D 39
0,05	Leštění	D 20

Firma WINTER vyrobila na zakázku kotouč z PKD o zrnitosti **D 126** dle normy FEPA (Tab. 6.2). Tomuto údaji odpovídá průměrná velikost zrna 118  $\mu\text{m}$ . Tato hodnota je uváděna výrobcem. Kotouč nese označení: **1FF1V 100 – 15 – R62 – 31,75 D126 Ni**.

Kotouč je složen z rotačního ocelového tělesa, na němž je galvanickou metodou nanесena brousicí vrstva z diamantových zrn. Brusná plocha kotouče má negativní tvar k povrchu obráběné součásti. Poloměr zaoblení je 62 mm, tedy stejně jako na součásti. Na obrázku č. 6.2 je zobrazen řez kotoučem s rozměry. Po opotřebení brousicí vrstvy bývá vnější průměr kotouče orovnáán na základní materiál a poté je na něj nanесena nová vrstva brusiva. Výhodou tohoto procesu je, že se kotouč nemusí vyrábět celý znovu. Tímto se sníží pořizovací náklady. Tento kotouč je schopen obrousit 25 daných součástí. Poté je nutné koupit druhý, respektive provést renovační proces na stávajícím.

Brusný kotouč je charakteristický svým specifickým tvarem brousicí plochy, proto nemohla být nová technologie ve výrobě testována ihned. Kotouč bylo nutno vyrobit a dodací lhůta činila 1 měsíc od zadání objednávky.



Obr. 6.2 Brusný kotouč 1FF1V 100 – 15 – R62 – 31,75 D126 Ni [3]

Tab. 6.3 Pořizovací cena kotouče

Označení brusného kotouče	Cena kotouče	Životnost kotouče	Cena na 1 součást
1FF1V 100-15-R62-31,75 D126 Ni	8 156 Kč	25 součástí	326 Kč

### 5.3. *Určení řezných podmínek*

Řezné rychlosti při broušení jsou několikanásobně vyšší než při soustružení slinutým karbidem. Řezná rychlost má velký vliv na jakost povrchu obráběného materiálu. Při zvyšování řezné rychlosti, se hodnota jakosti povrchu zvyšuje. Avšak jestliže je příliš veliká, třísky ubírané jednotlivými zrny se zeslabí a tlaky na zrna jsou menší. To má stejný účinek, jako kdyby kotouč ztvrdl. Leští, místo aby brousil. Malý tlak na zrno někdy nestačí vylomit tupé zrno, kotouč se ucpává nebo pálí broušený povrch tupými zrny. Při zvyšování řezné rychlosti je nutné úměrně zvyšovat i rychlost posuvu kotouče do řezu. [10]

Při zjišťování nejvhodnějších řezných parametrů si firma Honeywell nemohla z ekonomických důvodů dovolit vyrobit špatný kus. Základní materiál je relativně drahý. Kdyby došlo k jeho poškození při volbě nesprávných řezných podmínek, součást by již nebylo možné z technologických důvodů opravit. Z ekonomického hlediska nebylo možné vyrobit ani experimentální vzorek, na kterém by bylo obrábění testováno. Hledání optimálních řezných podmínek tedy bylo velice obtížné.

Nakonec musely být řezné podmínky určeny experimenty přímo ve výrobě. Muselo se však postupovat extrémně opatrně. Při volbě otáček se muselo vycházet z doporučených parametrů diamantového kotouče. Nejprve bylo nutné zvolit přibližné hodnoty, vyplývající z předepsaných hodnot v bulletinu k nástřiku. Jedině s pomocí zkušeného technologa, který se s podobnou problematikou již setkal, bylo možné najít bezpečné a co možná nejefektivnější řezné podmínky pro broušení těžkoobrobitelného materiálu, jako je tento cermetový povlak.

V bulletinu k nástřiku METCO 81 VF-NS jsou bohužel uvedeny doporučené řezné podmínky pouze pro broušení vnitřních průměrů a to podélným posuvem. Uvedené hodnoty (Tab. 6.4) jsou doporučovány pro kotouč GC 80-K11-VR jehož vnější průměr je 80 mm. Otáčky jsou zde uvedeny pro součást o průměru 124 mm.



Tab. 6.4 Doporučené řezné podmínky

$v_s$	28 - 33 m · s <sup>-1</sup>
$v_w$	30 m · min <sup>-1</sup>
$f$	1,96 mm
$d_s$	80 mm
$d_w$	124 mm
$n_s$	6700 - 7900 min <sup>-1</sup>
$n_w$	77 min <sup>-1</sup>

Z údajů doporučených pro kotouč GC 80-K11-VR (Tab. 6.4) bylo možné převést řezné podmínky pro kotouč 1FF1V 100 – 15 – R62 – 31,75 D126 Ni (Tab. 6.5).

Tab. 6.5 Převedené řezné podmínky

$v_s$	28 - 33 m · s <sup>-1</sup>
$v_w$	30 m · min <sup>-1</sup>
$f$	1,56 mm
$d_s$	100 mm
$d_w$	124
$n_s$	5300 - 6300 min <sup>-1</sup>
$n_w$	95 min <sup>-1</sup>

Při obrábění zadaného dílce se však jednalo o broušení vnějšího průměru radiálním způsobem. Při zapichování se brousí celá délka najednou kotoučem o trochu širším než je broušená součást. Jedná se o broušení přísuvem (radiální způsob – zapichování). Jde tedy o odlišnou metodu broušení. Proto musely být řezné podmínky zvoleny jiným způsobem.



Technologové ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. se s problémem, kdy není přesně dáno, za jakých podmínek se bude daná součást obrábět, setkávají často. Bylo tedy nutné využít především veškerých praktických znalostí. Dle zkušeností technologa tedy byly postupně navrženy všechny řezné podmínky, tedy otáčky kotouče, otáčky obráběného dílce a velikost přísuvu.

Jako první byly zvoleny otáčky dílce  $n_w = 20 \text{ min}^{-1}$ , otáčky kotouče  $n_s = 7000 \text{ min}^{-1}$  a přísuv  $f_r = 0,076 \text{ mm}$  (0,003 palce). Po prvním odebrání materiálu nejevil povrch nástřiku žádné známky po odlupování. Proto bylo možné otáčky dílce zvýšit na dvojnásobek. To znamená  $n_w = 40 \text{ min}^{-1}$ . Touto změnou se dospělo ke kratšímu času na obrábění. Povrch nástřiku byl opět zkontrolován a byla započata výroba ostatních kusů.

Zvolené řezné podmínky (Tab. 6.6) se liší od převedených (Tab.6.5). Je to dáno tím, že řezný proces může ovlivnit mnoho faktorů uvnitř dané firmy. Jsou to především použité nástroje, stav stroje, zkušenosti pracovníků, požadavky kladené na kvalitu obrobení součástí a další.

Tab. 6.6 Zvolené řezné podmínky

$v_s$	$36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
$v_w$	$16 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
$f_r$	$0,076 \text{ mm}$
$d_s$	$100 \text{ mm}$
$d_w$	$124 \text{ mm}$
$n_s$	$7000 \text{ min}^{-1}$
$n_w$	$40 \text{ min}^{-1}$

### 5.4. *Sled operací*

Dle naměřených celkových strojních časů (změřeny pracovníkem firmy Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.) byly vypočítány cenové náklady na jednotlivé operace. Vzorový výpočet nákladů není uveden, neboť firma Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. nemohla poskytnout některé informace z důvodu ochrany dat. Jsou zde tedy uvedeny pouze konečné hodnoty (Tab. 6.7). Náklady na odmašťování jsou určeny jako náklady fixní. Celkový čas potřebný k vyrobení součásti činí 191 minut při celkové ceně 2035 Kč.

Tab. 6.7 Sled operací při obrábění nástřiku broušením

č.op.	operace	čas [min]	cena [Kč]
10	Odmašťování	28	1
20	Tryskání před plazmou	20	164
30	Plasma Spray	50	604
40	Ruční práce	32	251
50	Broušení	45	876
60	Popis dílce	4	31
70	Kontrola	12	108
<b>celkem</b>		<b>191</b>	<b>2035</b>

### 5.5. *Kontrola povrchu*

Bylo broušeno 10 kusů u kterých byl následně zkontrolován nanesený povlak a drsnost povrchu. Po broušení nebyly nalezeny stopy po odloupení nástřiku. Hodnoty drsnosti měly odpovídat hodnotám uvedených na výkrese. Na každém kusu součásti bylo provedeno měření ve 3 náhodných bodech na povrchu dílce. Měření bylo prováděno pomocí přístroje Hommel Tester T 500 v podélném směru. Byla vypočítána průměrná hodnota udávající směrodatný údaj potřebný k celkovému zhodnocení.

V tabulce č. 6.8 jsou uvedeny naměřené hodnoty součásti s pořadovým číslem 21, tedy první součásti, která byla obráběna broušením. Pro tuto součást je uveden vzorový výpočet. Výsledky průměrných hodnot u ostatních součástí byly zaznamenány do tabulky č. 6.9. Ve firmě Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. se ve většině případů měří pouze parametr Ra. Ostatní parametry, jako je Rz, jsou měřeny pouze výjimečně. Proto při kontrole obrobeného povrchu na tomto dílci postačovalo měření střední aritmetické úchylky profilu Ra.

Tab. 6.8 Naměřené hodnoty dílce č. 21

č. měření	1	2	3
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,21	1,60	1,48

#### Výpočet průměrné hodnoty Ra u dílce č. 21: [19]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n x_i \quad (6.1)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{3} \cdot (1,21 + 1,60 + 1,48) \quad (6.2)$$

$$\bar{x} = 1,43 \text{ } \mu\text{m} \quad (6.3)$$

Dle výkresové dokumentace by měl parametr drsnosti odpovídat Ra 0,8  $\mu\text{m}$ . Z výpočtu střední hodnoty z naměřených parametrů vyplývá, že naměřená průměrná hodnota byla Ra 1,43  $\mu\text{m}$ . Bylo tedy zřejmé, že kvalita povrchu nevyhovovala.

Tab. 6.9 Tabulka průměrných naměřených hodnot u všech 10-ti broušených dílců

Dílec č.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,21	1,40	1,60	1,43	1,52	1,59	1,4	1,6	1,2	1,3



## 5.6. *Zhodnocení*

Nová technologie zabezpečovala snadné obrobení nástřiku. Zabraňovala nežádoucím procesům při výrobě, jako bylo odlupování a vytrhávání materiálu, který neměl být odebírán. Měřením bylo zjištěno, že broušením nebyla docílena požadovaná drsnost. Pro dodržení požadovaných hodnot bylo důležité najít správné podmínky obrábění. Bylo nutné zabezpečit dostatečnou kvalitu výrobku, která je prioritou. Vždy je nutné hledat techniky a předpověď drsnosti ještě před samotným obráběním.

Aby dílec splňoval zadané podmínky, bylo nutno na broušených součástech provést opravu. Ta však probíhala jiným způsobem, než tomu bylo po soustružení. Nástřik již nebyl odstraňován. Byl pouze upraven jinou metodou, při minimálním úběru materiálu. Touto technologií se diplomová práce blíže nezabývá. Oprava ale nebyla tolik nákladná, jako tomu bylo při opravě po soustružení. Proto i v tomto případě nebyla výroba pozastavena. Za optimální stav tento způsob nemohl být považován a proto byla navržena druhá varianta, od které bylo očekáváno konečné vyřešení problému.



## 6. Druhá varianta broušení

Zavedením technologie broušení bylo docíleno kvalitního obrábění nástřiku. Nedocházelo k odlupování. Avšak nebylo možné dosáhnout požadované drsnosti povrchu. Drsnost povrchu ovlivňuje:

- geometrie řezné části nástroje,
- plastická deformace při tvorbě třísky,
- řezné podmínky procesu obrábění,
- tření řezného klínu o obrobenou plochu.

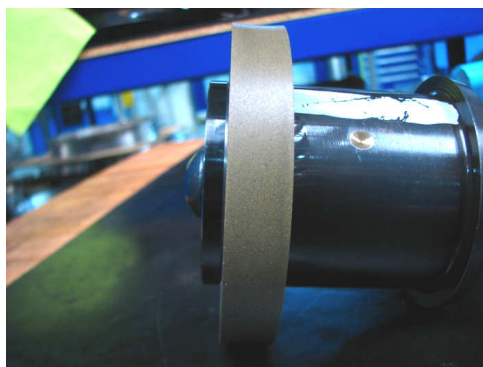
Bylo nutné hledat způsob, jak součást obrobit, aniž by došlo k nedodržení předepsané kvality povrchu. Technologie musela být upravena. Nabízely se následující možnosti:

- Změna obráběcího stroje. Ten má však vynikající osvědčené vlastnosti a dle předešlých zkušeností s výrobou podobných součástí bylo rozhodnuto, že na tomto pracovišti bude i nadále výroba pokračovat.
- Dále bylo možné upravit řezné podmínky. Je známo, že zvětšenou řeznou rychlostí se povrch zlepšuje, avšak pozměněním několika hodnot nastavení v tomto případě k významnému zlepšení nedošlo.
- Jedinou zbývajícím možností tedy bylo zvážit výměnu nástroje, tedy brusného kotouče. Volba jemnějšího kotouče měla přinést zlepšení povrchu obráběného povrchu nástřiku.

## 6.1. *Návrh nového kotouče*

Po komunikaci s firmou WINTER bylo odhaleno nedorozumění, ke kterému došlo při volbě prvního kotouče. První kotouč sice zaručoval požadovanou drsnost  $Ra\ 0,8\ \mu m$ , avšak při broušení podélným posuvem. Předpokládanou vadou brusného kotouče byla jeho zrnitost. Zrnitost je jedním z nejdůležitějších parametrů, který ovlivňuje drsnost obráběného povrchu součásti. Firma WINTER při volbě prvního kotouče postupovala správně. Zrnitost byla zvolena taková, která dle normy FEPA pohodlně zaručovala požadovanou drsnost obrobeného povrchu. Firma WINTER nyní musela zajistit kotouč, kterým by byla docílena požadovaná drsnost nástřiku při broušení radiálním způsobem (zapichováním), jenž byl použit při výrobě.

Druhý brusný kotouč nese označení: **1FF1V 100 – 15 – R62 – 31,75 D91 Ni**



*Obr. 7.2 Brusný kotouč 1FF1V 100-15-R62-31,75 D91 Ni v nástrojovém držáku [3]*

Byl tedy navržen kotouč nový. Jedná se o stejný typ nástroje. Kotouč je diamantový a má totožné rozměry. Rozdíl mezi původním je tedy pouze v jeho zrnitosti. Tento kotouč má zrnitost **D 91** oproti prvnímu kotouči se zrnitostí D 126. Díky volbě jemnějšího zrna mělo být dosaženo lepší drsnosti povrchu při obrábění. Nový kotouč byl dodán opět 1 měsíc po objednání. Jeho cena byla totožná s cenou předchozího. Než byl kotouč uveden do provozu, byly prvním kotoučem obráběny další součásti, u kterých bylo nutno povrch s nevyhovující drsností opravovat.

## 6.2. *Kontrola povrchu*

Dle vizuální kontroly součásti po obrábění novým kotoučem je patrné, že nástřik po broušení nevykazuje známky odloupenutí. Řezné podmínky jsou tedy nastaveny správně. Dále bylo nutno změřit drsnost povrchu. Byl opět použit přístroj Hommel Tester T 500. Výsledky byly dosazeny do tabulky a byla vypočtena průměrná střední aritmetická úchylka profilu Ra. Měření proběhlo na deseti vyrobených kusech.

Tab. 7.1 Naměřené hodnoty dílce č. 31

č. měření	1	2	3
Ra [μm]	0,78	0,79	0,78

**Výpočet průměrné hodnoty Ra u dílce č. 31:**

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7.1)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{3} \cdot (0,78 + 0,79 + 0,78) \quad (7.2)$$

$$\bar{x} = 0,78 \text{ μm} \quad (7.3)$$

Tab. 7.2 Výsledky měření drsnosti u dalších 10-ti dílců

Dílec č.	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Ra [μm]	0,78	0,79	0,80	0,80	0,72	0,75	0,77	0,79	0,79	0,80

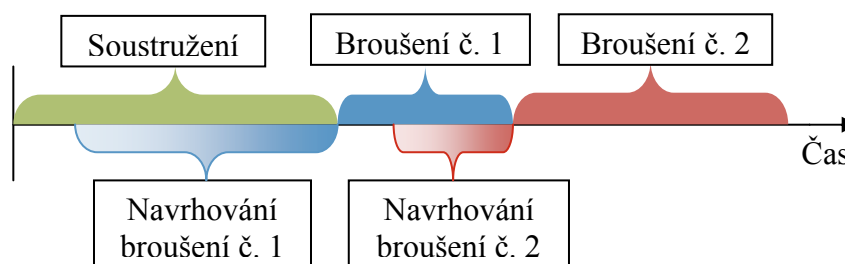


### 6.3. Vyhodnocení výsledků

Po obrobení dílce č. 31 byla na jeho povrchu změřena drsnost  $Ra\ 0,78\ \mu m$ . Tato hodnota je nižší než  $Ra\ 0,8\ \mu m$  a tedy vyhovující. Z výsledků měření vyplývá, že touto navrženou metodou se konečně docílilo požadované drsnosti povrchu. Změnou kotouče bylo dosaženo požadovaných parametrů. U každého vyrobeného dílce proběhlo důkladné měření a u žádného z nich nebyly zjištěny vady týkající se odloupenutí nástřiku či nevyhovující drsnosti povrchu. V současné době probíhá úspěšná výroba dalších kusů.

Starý brusný kotouč je nyní nevyužitý. Má specifický tvar a byl určen pouze pro broušení tohoto dílce. Byl uložen do skladu a ve firmě zatím nemá uplatnění. Neexistují totiž součásti, které by šlo tímto nástrojem obrábět.

Jak již bylo několikrát zmíněno, návrh výroby neprobíhal mezi jednotlivými výrobními procesy, ale za chodu během výroby. Podmínky byly neustále optimalizovány, až bylo dosaženo zdárného řešení. V tu chvíli byla teprve spuštěna výroba novou technologií. Na obrázku č. 7.1 je naznačeno jakým způsobem byla nová technologie navrhována.



Obr. 7.1 Časová osa výroby při současném navrhování nové technologie



## 7. Technicko – ekonomické zhodnocení

V této závěrečné části diplomové práce bylo vypracováno technicko - ekonomické zhodnocení celé technologie. Byly zde porovnány oba způsoby obrábění a vypočítány úspory, které měly prokázat zřetelný úspěch nové metody.

Roční výrobní dávka činí 51 kusů. Z toho 20 kusů bylo soustruženo, dalších 10 kusů broušeno prvním kotoučem a ostatní dílce byly obráběny pomocí druhého brusného kotouče. Strojní časy a cenové náklady na jednotlivé procesy výroby byly určeny sečtením celkových časů a nákladů u veškerých operací, z kterých se každý proces skládal. Celkem se jednalo o 5 výrobních procesů.

1. Soustružení
2. Opravný proces
3. Soustružení s jedním opravným procesem
4. Soustružení s dvěma opravnými procesy
5. Broušení

Při použití níže uvedených vzorců bylo možné dospět k hodnotám uvedených dále v porovnávacích tabulkách. Tabulky byly vypracovány v programu Microsoft Excel.

Z dvaceti soustružených dílců byly pouze 2 kusy obrobny napoprvé (viz příloha). Tedy v 10 % případů. Zbylých 90 % muselo být opravováno. Z tohoto důvodu je soustružení neekonomické. Cílem této kapitoly bylo tuto tezi prokázat.

## 7.1. Náklady

Hodnoty strojních časů a cenových nákladů byly získány z tabulek sledů operací, které jsou uvedeny v předchozích kapitolách diplomové práce. Byly vytvořeny kombinace soustružení a opravného procesu.

Tab. 8.1 Náklady na výrobu 1 kusu

Náklady na kus		
	čas [min]	cena [Kč]
Soustružení napoprvé	187	1676
Opravný proces	232	2094
2 opravné procesy	464	4188
Soustružení a opravný proces	419	3770
Soustružení a 2 opravné procesy	651	5864
<b>Průměrné náklady na soustružení</b>	<b>442</b>	<b>3979</b>
<b>Broušení</b>	<b>191</b>	<b>2035</b>

Tab. 8.2 Náklady na výrobu za 1 rok (51 ks)

Náklady za rok		
51 kusů	čas [min]	cena [Kč]
Soustružení napoprvé	9537	85476
Opravný proces	11832	106794
2 opravné procesy	23664	213588
Soustružení a opravný proces	21369	192270
Soustružení a dva opravné procesy	33201	299064
<b>Průměrné náklady na soustružení</b>	<b>22552</b>	<b>202949</b>
<b>Broušení</b>	<b>9741</b>	<b>103785</b>



## 7.2. Úspory

### a) Úspora strojního času při broušení

$$\begin{aligned}
 U_{tAC} &= t_{ACS} - t_{ACN} \\
 U_{tAC} &= 442 - 191 \\
 U_{tAC} &= \underline{\underline{251\text{min}}}
 \end{aligned} \tag{8.1}$$

$$\begin{aligned}
 U_{tACP} &= \left(1 - \frac{t_{ACN}}{t_{ACS}}\right) \cdot 100 \\
 U_{tACP} &= \left(1 - \frac{191}{442}\right) \cdot 100 \\
 U_{tACP} &= \underline{\underline{56,8\%}}
 \end{aligned} \tag{8.2}$$

kde:  $U_{tAC}$  ....úspora strojního času [min]  
 $t_{ACS}$  ....stávající strojní čas (soustružení) [min]  
 $t_{ACN}$  ....nový strojní čas (broušení) [min]  
 $U_{tACP}$ ...procentuální hodnota úspory strojního času [%]

### b) Úspora nákladů při broušení

$$\begin{aligned}
 U_{NJK} &= N_{JKS} - N_{JKN} \\
 U_{NJK} &= 3979 - 2035 \\
 U_{NJK} &= \underline{\underline{1944\text{Kč}}}
 \end{aligned} \tag{8.3}$$

$$\begin{aligned}
 U_{NJKP} &= \left(1 - \frac{N_{JKN}}{N_{JKS}}\right) \cdot 100 \\
 U_{NJKP} &= \left(1 - \frac{2035}{3979}\right) \cdot 100 \\
 U_{NJKP} &= \underline{\underline{48,9\%}}
 \end{aligned} \tag{8.4}$$

kde:  $U_{NJK}$  ....úspora nákladů na výrobu jednoho kusu [Kč]  
 $N_{JKS}$  ....stávající náklady na výrobu jednoho kusu (soustružení) [Kč]  
 $N_{JKN}$  ....nové náklady na výrobu jednoho kusu (broušení) [Kč]  
 $U_{NJKP}$ ...procentuální hodnota úspory nákladů na výrobu 1 kusu [%]



Tab. 8.3 Úspory při broušení

Úspory při broušení	Čas [min]	Cena [Kč]
Celková úspora za 1 kus	<b>251</b>	<b>1944</b>
Celková úspora za rok (51 kusů)	<b>12811</b>	<b>99164</b>

Tab. 8.4 Procentuální úspory při broušení

Úspora při broušení	Čas [%]	Cena [%]
Procentuální úspora	<b>56,8</b>	<b>48,9</b>

Při výpočtu nákladů na broušení byly zanedbány náklady na opravy dílce po broušení prvním kotoučem. Při broušení tedy byla zaručena výroba dílců napoprvé. V tabulce č. 8.3 jsou uvedeny úspory při broušení dílce napoprvé. Hodnoty pro úspory za rok byly vypočítány dle stejných vzorců. Výsledky byly násobeny 51 kusy, tedy roční výrobní dávkou. Z výpočtu procentuálních hodnot (Tab. 8.4) je zřejmé, že úspora strojního času činí 56,8 %. Úspora cenových nákladů je pak 48,9 %.

### c) Úspora při soustružení napoprvé

Tab. 8.5 Úspory při soustružení napoprvé

Úspory při soustružení napoprvé	Čas [min]	Cena [Kč]
Celková úspora za 1 kus	<b>4</b>	<b>359</b>
Celková úspora za rok (51 kusů)	<b>204</b>	<b>18309</b>

Tab. 8.6 Procentuální úspora při soustružení napoprvé

Úspora při soustružení napoprvé	Čas [%]	Cena [%]
Procentuální úspora	<b>2,1</b>	<b>21,4</b>



V tabulce č. 8.5 jsou uvedeny úspory, které by nastaly v případě, že by se povedlo soustružit nástřík napoprvé. Hodnoty byly získány výpočtem ze vzorců 8.1 a 8.3 s tím, že za hodnotu stávajícího strojního času (cenových nákladů) byla dosazena hodnota strojního času (cenových nákladů) soustružení součásti napoprvé (z tab. 8.1 a 8.2).

Hodnoty procentuálních úspor byly vypočteny podle vzorce 8.4. Z tabulky č. 8.6 je zřejmé, že jestli-že by se podařilo součást obrobit napoprvé, strojní časy by byly o 2,1 % kratší a cenové náklady o 21,4 % nižší oproti broušení. Soustružení by tedy bylo ekonomicky výhodnější.

### 7.3. ***Shrnutí***

- Jestli-že je pravděpodobnost, že se v 10 % vyrobí součást napoprvé (tj. 2 dílce z 20), tak průměrný strojní čas výroby jedné součásti bude 442 minut při ceně 3979 Kč.
- Broušením byl dílec vyroben vždy napoprvé. To znamená, že strojní čas činí 191 minut při ceně 2035 Kč.
- Úspora při výrobě jednoho dílce broušením je tedy 251 minut a 1944 Kč ve prospěch broušení.
- Úspora za rok (tj. za 51 kusů) činí 12811 minut a 99164 Kč.
- V procentuálním rozboru bylo dosaženo výsledku, že při broušení bylo ušetřeno 56,8 % strojního času.
- Cenové náklady byly sníženy o 48,9 %.

Z tabulky úspor je patrné, že jestli-že je vyrobena součást napoprvé, je výhodnější soustružení. Jestli-že je však objevena vada na povrchu nástříku, je ji nutno opravit. Tímto soustružení svou výhodu ztrácí, neboť se náklady zvýší přibližně o 50 % . V tomto případě je vhodné broušení, neboť pravděpodobnost, že se dílec vyrobí napoprvé soustružením, je nízká (10 %). Závěrem je tedy nutno konstatovat, že broušení je, přes své vyšší počáteční náklady výhodnější a úspornější než soustružení daného dílce.



## 8. Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout novou technologii, díky které by se dospělo k výrazné změně při výrobě zadané součásti. Současná metoda obrábění představovala značné nevýhody. Vlivem špatně zvolené technologie docházelo k nežádoucím procesům při obrábění. Obrobený povrch vykazoval nevyhovující kvalitu a bylo jej nutno opravovat. Důsledkem toho bylo prodlužování výrobních časů, čímž se rapidně zvyšovaly výrobní náklady. Byla tedy navržena nová technologie broušení. Tento způsob se jevil jako nejvhodnější pro opracování daného nástřiku. Byla zvolena bruska, brusný kotouč a řezné podmínky.

Volba řezných podmínek byla stěžejním bodem při návrhu nové technologie. Hlavní problém spočíval v nedostatečných teoretických znalostech o obrábění daného povlaku. Bylo nutné dbát zvýšené opatrnosti při nastavování jednotlivých parametrů, neboť zkoušky probíhaly přímo ve výrobě. Bylo nepřipustné zapříčinit znehodnocení vyráběné součásti. Tvrdé nástřiky z cermetů tvoří skupinu materiálů, pro něž nejsou zcela známy optimální podmínky, při kterých je lze co nejefektivněji obrábět. Výrobci těchto moderních materiálů jsou schopni doporučit určité parametry, avšak v daném provozu se tyto řezné podmínky mohou od optimálních značně odlišovat. Zvolené řezné podmínky byly určeny pomocí praktických zkušeností získaných při práci s těmito těžkoobrobitelnými materiály. Firma Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. zaměstnává zkušené profesionály s jejichž pomocí bylo možné tento tvrdý povlak efektivně obrábět.

Po broušení byla u každého dílce provedena závěrečná kontrola povlaku, při které nebylo zjištěno žádné poškození. Byla však naměřena nevyhovující drsnost povrchu. Tento nežádoucí stav byl rychle odstraněn. Proběhla výměna brusného kotouče s nižší hodnotou zrnitosti. Než byl nový kotouč vyroben a dodán, výroba starým kotoučem probíhala dále. Obrobené dílce musely být opraveny. Opravný proces však měl minimální vliv na chod nově zavedené výroby. Prodloužení strojních časů bylo minimální, protože oprava probíhala na méně vytíženém pracovišti. Ekonomické důsledky tedy byly zanedbatelné.



Závěrem lze říci, že nově navrženou technologií bylo dosaženo kladných výsledků. Po obrobení všech dílců byla výroba vyhodnocena jako hospodárně úspěšná. Dosažené úspěchy nejlépe charakterizuje výše úspor, jejichž výpočet byl proveden při technicko-ekonomickém zhodnocení, kde byla nová technologie porovnána s původní. Přínosem diplomové práce je tedy technologie, která významně snižuje náklady na obrábění žárového nástřiku, jenž je nanesen na tenkostěnné součásti.





## Použitá literatura

- [1] KMM: Žárové nástřiky [online]. 2012 [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/index.html>
- [2] BROOKES, K. *World Directory and Handbook of Hardmetals and Hard Materials*. United Kingdom: International carbide data, 1992. ISBN 0950899526.
- [3] Firemní podklady společnosti Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.
- [4] Cermet. *Wikipedia EN* [online]. 2011 [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Cermet>
- [5] MM Průmyslové Spektrum. *Technologie žárového nástřiku v leteckém průmyslu* [online]. 2001 [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-zaroveho-nastriku-v-leteckem-prumyslu.html>
- [6] SULZER METCO. *Metco® 81VF-NS Chromium Carbide - Nickel Chromium Powder* [Technical bulletin]. 2000 [cit. 2012-05-07].
- [7] PODJUKLOVÁ, J. *Speciální technologie povrchových úprav I*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1994. ISBN 80-7078-235-8.
- [8] ČSN EN ISO 14924. *Žárové stříkání - Dodatečné úpravy a konečná úprava žárově stříkaných povlaků*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [9] ČSN EN ISO 14923. *Žárové stříkání - Charakterizace a zkoušení žárově stříkaných povlaků*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [10] PŘÍKRYL, Z. *Obrábění: I. díl Technologie obrábění*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957.



- [11] Vacuum Plasma Spraying TOCALO. *Tocalo* [online]. 2012 [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: [http://www.tocalo.co.jp/e\\_tech\\_vps.html](http://www.tocalo.co.jp/e_tech_vps.html)
- [12] Plazmové stříkání. *Lidovky.cz* [online]. 2012 [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: [www.lidovky.cz](http://www.lidovky.cz)
- [13] DOBROVOLNÝ, B. *Broušení*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960.
- [14] BRYCHTA, J., ČEP, R., NOVÁKOVÁ, J., PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [15] SPRINGFIELD 25 E CROWN. [online]. 2012 [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://www.robertsmachinery.com/spring25e.html>
- [16] HOMMEL CS S.R.O. *Hommel Tester T 500* [online]. 2012 [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://www.hommel-etamic.cz/>
- [17] CZ TECH. *CZ TECH SP 30* [online]. [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://www.cztech.cz/cnc.html>
- [18] *SECO Tools* [online]. [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.secotools.com>
- [19] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie: část I*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2006. ISBN 80-248-0671-1.
- [20] LÓPEZ, L.N., LAMIKIZ, A. Turning of thick thermal spray coatings. *Journal of spray technology*. 2001, roč. 10, č. 2. ISSN 1059-9630.
- [21] MIKOVEC, M. *Obrábění materiálů s velkou pevností a tvrdostí*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982.
- [22] WINTER SUPERABRASIVES. [online]. [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.winter-superabrasives.com>
- [23] FEPA. *Federation of European Producers of Abrasives* [online]. [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.fepa-abrasives.org>

## Příloha

Tab. Náklady na výrobu při soustružení prvních 20 kusů (OP – opravný proces)

Dílec č.	Soustružení	OP	OP	Čas [min]	Cena [Kč]
1	OK	-	-	187	1676
2	odlupování	OK	-	419	3770
3	OK			187	1676
4	odlupování	OK		419	3770
5	odlupování	odlupování	OK	651	5864
6	odlupování	OK	-	419	3770
7	odlupování	OK	-	419	3770
8	odlupování	OK	-	419	3770
9	odlupování	OK	-	419	3770
10	odlupování	OK	-	419	3770
11	odlupování	odlupování	OK	651	5864
12	odlupování	OK	-	419	3770
13	odlupování	OK	-	419	3770
14	odlupování	OK	-	419	3770
15	odlupování	OK	-	419	3770
16	odlupování	OK	-	419	3770
17	odlupování	odlupování	OK	651	5864
18	odlupování	odlupování	OK	651	5864
19	odlupování	OK	-	419	3770
20	odlupování	OK	-	419	3770